

L a industria del uranio

Federico Lazarín Miranda

Departamento de Filosofía, UAM Iztapalapa. Área de Historia del Estado y la Sociedad.
Cuerpo Académico de Historia Mundial (flm@xanum.uam.mx)

Resumen

El objetivo de este artículo es reconstruir y analizar las características de las fases industriales en las que el uranio es convertido en vainas para su uso en las plantas generadoras de energía eléctrica. El uranio es un elemento químico metálico que se encuentra en la naturaleza en bajas proporciones en rocas, tierra, agua y seres vivos. Para utilizarlo como combustible en plantas nucleares no basta con encontrarlo y extraerlo del subsuelo terrestre, este mineral debe ser sometido a varios procesos antes de su arribo a las nucleoeeléctricas. Al sector encargado de llevar a cabo estas labores se le conoce como industria del uranio.

Dicha industria se compone de tres fases fundamentales: 1. La extractiva, en donde se lleva a cabo la prospección y exploración, en seguida la explotación de la mina, y finalmente, el beneficio que establece los límites de la recuperación formándose las reservas del uranio; 2. La Industrial propiamente dicha se ocupa de la refinación, conversión, enriquecimiento y elaboración de vainas de combustible uranífero y 3. La generación de energía nucleoeeléctrica.

Es importante señalar que en este tipo de actividad se entremezclan elementos científicos y tecnológicos, políticos e industriales.

Palabras clave: Uranio, Industria, Ciencia, Tecnología, Transferencia.

Abstract

Uranium industry

The objective of this article is to reconstruct and analyze the characteristics of the industrial phases in which the uranium is converted to pods for use in power generators.

Uranium is a metallic chemical element that is found in nature in low proportions in rocks, soil, water and living beings. For use as fuel in nuclear power plants there are not enough to find it and remove it from the subsurface land, this mineral should be subjected to various processes prior to their arrival in the nuclear utilities. The sector responsible for carrying out these tasks is known as uranium industry.

This industry consists of three main phases: 1. The extractive, the prospecting and exploration, followed by, the exploitation of the mine and, finally, the benefit, which sets the limits of recovery forming the reserves of uranium; 2. The Industrial itself is responsible for the refining, conversion, enrichment and reprocessing of uranium fuel pods and 3. The generation of nuclear power. It is important to note that in this type of activity scientific and technological are intermingled with political and industrial elements.

Keywords: Uranium, Industry, Science, Technology, Transference

Introducción

La energía nuclear nació marcada por el temor a la destrucción que podía causar su uso ya fuese con fines militares o pacíficos. En general, la primera imagen que se tiene al mencionar esta energía es el hongo de humo y vapores producido por un estallido nuclear. Difícilmente, la primera imagen que se tiene es la de una planta nuclear dotando de energía a una población. Esta es una paradoja de la ciencia e industria de la segunda mitad del siglo XX. La ciencia y la industria formaron una alianza que generó nuevos conocimientos y tecnologías, con la idea de llevar a la población bienestar, pero las imágenes difundidas después de los ataques nucleares a Japón, sembraron en la mayor parte de la población incertidumbre y temores respecto a esa relación entre la ciencia y la industria (Azuela y Tancón, 1999: 11-13).

El proyecto Manhattan (1942-1945) dio inicio a la era nuclear en el mundo, el objetivo final de éste era elaborar una bomba de una capacidad destructiva sin precedentes. Impulsado por el gobierno de los Estados Unidos con el apoyo de Gran Bretaña, fue el proyecto de investigación más grande y costoso de la historia. Por razones de seguridad y para mantener en secreto este programa se establecieron distintos centros de investigación y desarrollo tecnológico en universidades, institutos y plantas en diferentes estados de la Unión Americana. El más famoso de todos éstos ha sido el Laboratorio Nacional de Los Álamos en el desierto de Nuevo México, administrado por la Universidad de California.

En julio de 1945, se llevó a cabo la Prueba Trinity, cuando se hizo estallar la primera bomba atómica del mundo, cerca de Alamogordo en Nuevo México. El proyecto continuó, al mes siguiente ya se tenían dos bombas para ser usadas como armas de guerra. Los objetivos seleccionados estaban sobre el territorio del imperio japonés: el 6 de agosto se detonó la primera de uranio (U^{235}), denominada *Little Boy*, sobre la ciudad de Hiroshima; la segunda,

llevaba por nombre *Fat Man* y era de Plutonio (Pu^{239}), fue arrojada sobre la ciudad de Nagasaki tres días después.

Además de obligar a la rendición del Japón y provocar el fin de la Guerra del Pacífico, estos acontecimientos pusieron de manifiesto la relación entre la ciencia, la industria y la política. La ciencia se convirtió en un asunto de seguridad nacional, pues si los conocimientos y tecnologías para elaborar las bombas atómicas caían en manos de las potencias rivales de los Estados Unidos y Gran Bretaña, ello quitaría la ventaja estratégica y política a éstas¹.

Otra situación que provocó este proyecto fue la relación entre ciencia, desarrollo de nuevas tecnologías y surgimiento de una nueva industria, de tal forma que el tamaño del proyecto Manhattan llevó a los EE.UU. a la necesidad de crear nuevos programas nucleares. El costo fue aproximadamente 3,000'000,000 de dólares estadounidenses, había plantas para la extracción, procesamiento y elaboración de combustible nuclear por lo menos en once estados de la Unión Americana y otras tantas universidades del país como las de California, Princeton, Chicago, Illinois o Columbia por mencionar las más importantes, para el proyecto.

A partir de estos hechos se derivaron dos alternativas para el uso de la energía nuclear: la militar y la pacífica. La primera, sirvió para desarrollar distintos tipos de bombas e incluso vehículos como submarinos, buques de batalla y portaviones. La segunda, se utilizó en la generación de energía eléctrica, investigación en física experimental, biológica y aplicaciones médicas.

Estas alternativas hicieron que surgiera la industria nuclear, es decir, toda una serie de unidades económicas que se encargarían de la búsqueda (prospección) y extracción, elaboración de combustibles y materiales radiactivos para el uso militar o pacífico de la energía nuclear. Éste es un tema muy poco estudiado: la industria nuclear.

Es importante señalar que a pesar de la existencia de distintos materiales radiactivos en la naturaleza y que incluso una de las bombas utilizadas en Japón era de Pu^{239} , la industria nuclear se desarrolló básicamente alrededor del uso del U^{235} . De tal forma que el objetivo de este artículo es reconstruir y analizar las características de la industria del uranio, en las siguientes fases: a. de búsqueda y extracción, b. de transformación en donde el uranio es convertido en combustible nuclear c. de diseño y construcción de reactores nucleares y d. de uso en las plantas generadoras de energía eléctrica.

¿Qué son el uranio y la energía atómica?

En primer lugar definiremos qué es el uranio. Desde el punto de vista de la química es el elemento número 92 de la tabla periódica, fue descubierto en 1789 por el químico Martin Heinrich Klaproth (1743-1817) en Wernigerode, Brandeburgo, quien lo bautizó de esa forma pues ocho años antes se había descubierto el planeta Urano² (Agrupación).

¹ Ello sucedió de todas formas, pues en 1949 la Unión de Repúblicas Soviéticas Socialistas (URSS) realizó su primer estallido nuclear.

Las características del uranio son las siguientes: es un elemento químico metálico que se encuentra en bajas proporciones en la naturaleza; en rocas, tierra, agua, polvo y seres vivos, es decir, que en nuestra vida cotidiana podemos interactuar con él sin percibirlo. Por ejemplo: la combustión del carbón y derivados del petróleo producen bajas emisiones de óxido de uranio. En el subsuelo se encuentra incrustado en otros minerales, de tal forma que al extraer rocas y tierra que lo poseen deben ser sometidos a un proceso de separación, para su explotación industrial. Su número atómico es 92, su masa atómica: 238.02891u, su símbolo es U, su punto de fusión es aproximadamente 1,132° Celsius y su punto de ebullición es aproximadamente 4,131° C (Ojo científico y Geosalud).

El U se encuentra en la naturaleza en tres diferentes formas o isótopos³ (Energía nuclear): el U²³⁴, el U²³⁵ y el U²³⁸. El más común de estos isótopos en la naturaleza es el U²³⁸, sin embargo, el material que sirve para llevar a cabo la fisión nuclear es el U²³⁵ que sólo representa el 0.712% del uranio natural, por lo que el U²³⁸ debe someterse a procesos industriales que se conocen como de enriquecimiento para ser utilizado en la fabricación de bombas, la generación de energía eléctrica o usos médicos (Ojo científico).

En 1958, Manuel Álvarez Jr. ofrecía la siguiente clasificación de los depósitos de uranio:

1. De rocas ígneas, pegmatitas, vetas y depósitos relacionados.
2. Depósitos de carnotita en arenisca, cobre, uranio y otros minerales.
3. De otras rocas sedimentarias consolidadas.
4. De placeres.
5. De fluidos naturales (Álvarez, 1954: 45-49)

Para Álvarez Jr. el rasgo más notable de los depósitos minerales de uranio era la gran variedad de concentraciones encontradas en diversos medios geológicos. En ese año, se habían ubicado depósitos de mineral de uranio en rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas y en muchos tipos de rocas diferentes dentro de cada una de estas clasificaciones (Álvarez, 1954: 44-45).

El mismo autor, afirmó que estas concentraciones se formaron desde el periodo Precámbrico y hasta el final del Terciario, los depósitos primarios de uranio se distribuían en la corteza de la tierra, por lo menos en cuatro grandes zonas geológicas: 1. la faja de la cordillera de norte y Sudamérica, 2. las áreas marginales occidentales del Canadá, 3. las áreas de intrusiones ígneas en Europa y, 4. el área del espinazo continental del centro y sur de África.

² Urano fue descubierto en 1781 por William Herschel (1738-1822).

³ Los isótopos son átomos de un elemento químico, como el U, cuyo núcleo tiene el mismo número de protones pero diferente número de neutrones. Se descubrió la existencia de los isótopos como consecuencia del estudio de los elementos radiactivos naturales. El nombre de isótopo fue propuesto por el químico inglés Frederick Soddy (1877-1956) en 1911, el cual constató la igualdad de las propiedades químicas de átomos del mismo elemento, con diferente número de neutrones. La mayoría de los elementos naturales son formados por varios isótopos que sólo pueden ser separados por procedimientos físicos (difusión, centrifugación, espectrometría de masas, destilación fraccionada y electrólisis).

Además, aseguraba que se podían encontrar depósitos de uranio en las rocas sedimentarias en los Estados Unidos, éstas se distribuían en las areniscas y lodolitas de la altiplanicie y porciones adyacentes de Colorado, Utah, Arizona y Nuevo México, con concentraciones de carnotita y conjuntos minerales cuprouraníferos. Formaciones marinas fosfátíferas de los periodos Mioceno y Plioceno que contenían cantidades importantes de uranio en una amplia área del centro de Florida y capas de fosfato-uraníferos habían sido también localizadas en las formaciones pérmicas de Idaho, Montana y Wyoming. Calizas jurásicas del levantamiento Zuñi de Nuevo México contenían algunos depósitos de uranio. Afirmaba que había bajas concentraciones de uranio en varias formaciones de lutitas carbonosas de la edad Paleozóica en las regiones central y de las grandes llanuras y en las capas salinolacustres de California. Álvarez terminaba su exposición asegurando que depósitos semejantes en rocas sedimentarias correlativas habían sido encontradas en todo el mundo (Álvarez, 1954: 44-45).

Por su parte, la investigación sobre la energía nuclear tiene sus orígenes en 1938, cuando el físico alemán Otto Hahn (1879-1968) y su ayudante de investigación Fritz Strassman (1902-1980), bombardearon núcleos de uranio con neutrones, después de ello encontraron la presencia de bario, así concluyeron que ciertos elementos pesados como el U^{235} podían ser descompuestos en elementos más simples, pero no pudieron explicar el proceso. Al año siguiente, Lise Meitner (1878-1968), física austriaca que emigró a Suecia después de la toma del poder por los nazis y su sobrino, el también físico, Otto Frisch (1904-1922), concluyeron que el experimento de Hahn y Strassman había producido dos núcleos de uranio; explicaron el fenómeno y lo denominaron fisión. Además, calcularon la cantidad de energía que se podía generar por una explosión nuclear (McMellán y Dorn, 2006: 393-394, Gamov, 1971: 240-241, Bernal, 1960: 59-63).

En el verano 1939, Frisch se dirigió a Birmingham, Inglaterra, trabajó con el físico Rudolf Peierls (1907-1995) y redactaron un documento que se conoce como el Memorandum Frisch-Peierls. En este escrito propusieron que se podía provocar una detonación inmensamente poderosa utilizando una pequeña masa crítica de U^{235} , fenómeno que denominaron explosión atómica. En el Memorandum también establecieron los efectos de dicha explosión: desde el estallido inicial hasta la lluvia radiactiva⁴ (Gamov, 1971: 59-63).

La explosión atómica es posible debido a que se puede producir una reacción de fisiones nucleares en cadena a partir de la primera división de un átomo de U^{235} . A una masa crítica de U^{235} se le disparan varios neutrones (2,5 para el uranio en promedio) en el interior se encuentran núcleos, se forma así otra fisión, que arroja nuevos protones sobre los núcleos de los átomos restantes y así sucesivamente. Ello se conoce como reacción en cadena (Gamov, 1971: 243-244).

4 El concepto de masa o tamaño crítico es muy importante: "el tamaño de un trozo de una materia desintegrable dada para el cual el porcentaje de neutrones que dan lugar a procesos subsecuentes de fisión es bastante alto para asegurar una reacción progresiva en cadena se llama tamaño crítico de ese material particular".

Si lo que se requiere es utilizar energía nuclear para producir electricidad, entonces, es necesario producir una reacción en cadena bajo condiciones controladas, de manera que el fragmento de combustible debe mantenerse lo más cerca posible del tamaño crítico. Pero como una reacción nuclear en cadena es, por naturaleza, una reacción explosiva que genera grandes cantidades de calor, se debe controlar. Esto se puede realizar con una muy pequeña probabilidad de accidente, usando “varillas o barras de control” que contengan sustancias que absorban neutrones (como el boro). Estas barras son introducidas o sacadas automáticamente por estrechos canales perforados a través del combustible nuclear provocando que la proporción de neutrones disminuya o exceda el nivel deseado, lo que a su vez, incrementa o reduce la intensidad de la reacción en cadena (Gamov, 1971: 244).

Este proceso sucede en el interior de los reactores nucleares que se han empleado como fábricas de energía eléctrica, para la propulsión de los submarinos atómicos de los Estados Unidos o los buques rompehielos atómicos en Rusia.

Hasta ahora nos hemos referido al uranio, sus características como elemento químico y la forma como se produce la energía nuclear. La pregunta ahora es cómo se integró la industria del U. En el siguiente apartado analizaremos ese proceso.

¿Qué es la industria del uranio?

Para el propósito de este artículo utilizaremos una definición sencilla de industria como una unidad productiva en la que se llevan a cabo un conjunto de actividades para la extracción de materias primas del subsuelo ya sean fósiles o minerales, existen otras unidades productivas cuyo objetivo es transformar materias primas en bienes elaborados o semi-elaborados. Además de materias primas, para su operación, necesita maquinaria, bienes muebles e inmuebles, así como recursos humanos, todos estos elementos se organizan en empresas.

Por tanto, podemos considerar a la industria del uranio como el conjunto de empresas para llevar a cabo las actividades de prospección (búsqueda), extracción, beneficio, elaboración de materiales nucleares y la fabricación de artefactos para la utilización del uranio. Estas unidades productivas necesitan de recursos humanos desde semi-analfabetas, alfabetas, semi-especializados hasta altamente especializados. El personal semi-analfabeta y alfabetado lleva a cabo labores muy sencillas como limpieza, vigilancia de instalaciones, así como, labores de asistencia administrativa y operativa. Por otro lado, se encuentra el personal especializado y el semi-especializado: ingenieros geólogos, electricistas, civiles; así como químicos, físicos teóricos, experimentales y nucleares, además de administradores de empresas, entre otros.

Para McClellan y Dorn la bomba atómica es un gran ejemplo de la capacidad que tiene la ciencia básica de transmutarse en tecnología. Desde una visión optimista estos autores afirman que la emergencia de esta ciencia y tecnología de punta institucionalizó la posibilidad de un nuevo tipo de ciencia aplicada que garantizó gran cantidad de recursos económicos para explorar las fronteras de la ciencia y producir beneficios prácticos a la hu-

manidad. Estos elementos generaron una nueva relación entre teoría y práctica, en la que su aplicación industrial produjo nuevas empresas de alta tecnología (McClellan y Dorn, 2006: 392).

Después de 1945 el secreto se siguió conservando, pero la industria (sobre todo la estadounidense) necesitaba salir y competir en el mercado internacional, al año siguiente, los Estados Unidos aprobaron el Acta Sobre Energía Atómica permitiendo la transferencia de tecnología nuclear del área militar a la civil. Ese mismo año se creó la Comisión de Energía Atómica de los Estados Unidos con el objetivo de poner al alcance de la sociedad los usos y aplicaciones de la tecnología nuclear, las radiaciones y los radioisótopos.

El proyecto Manhattan empleó a más de 150 mil personas para desarrollar la primera bomba nuclear. Para José Antonio Rojas, esta situación propició el surgimiento de un impresionante consorcio nuclear, con múltiples y diversas instalaciones distribuidas en todo el país, además; consolidó una numerosa burocracia aliada con la política estadounidense y una fracción importante del capital monopólico y financiero internacional. Este autor considera que así se estableció una “hermandad nuclear” o los “barones nucleares”, que en 1989 estaba constituida por once consorcios financieros estadounidenses internacionales con influencia en la industria nuclear de otros países. Dichas empresas eran: J. P. Morgan and Company Bank; Bankers Trust, Chase Manhattan Bank; Manufacturers Hanover Trust Company Bank; Citicorp Bank; Chemical Bank; Prudential Life Insurance Company, Teachers Insurance and Annuity y Lord Abbett and Company (Rojas, 1989: 17-18).

En 1946 se estableció en la Organización de las Naciones Unidas (ONU) la Comisión de Energía Atómica, para regular y controlar la generación y utilización de la energía nuclear con fines militares (Ortega), el siguiente paso para el uso pacífico de esta energía se dio en 1953, cuando el presidente de los Estados Unidos, Dwight Eisenhower promovió en la ONU la política de Átomos por la Paz. Dos años después en agosto de 1955 se llevó a cabo la Primera Conferencia Internacional sobre la Utilización de la Energía Atómica con Fines Pacíficos, en Ginebra, Suiza. Para John D. Bernal este hecho constituyó uno de los principales indicios de distensión internacional. Antes de esta conferencia reinaba un completo secreto en las investigaciones atómicas y apenas se ofrecía alguna información que no servía para elaborar ingenios atómicos.

Desde la perspectiva de Bernal, en esta Conferencia los científicos atómicos de Estados Unidos, Gran Bretaña y URSS lograron un libre intercambio de información no relacionada directamente con las bombas y encontraron que habían recorrido, básicamente, los mismos caminos. Además, atribuye a Homi Jehangir Bhabha, físico de la India (1909-1966) y presidente de la Conferencia, la siguiente frase: “Una vez que el conocimiento se da, ya no se puede devolver” (Bernal, 1960: 63). Este autor consideraba que la Conferencia constituyó un primer paso para el establecimiento de la cordura en la ciencia, mostrando que se podía avanzar más rápidamente con la cooperación que con la rivalidad (Bernal, 1960: 63, OIEA, 1995: 5).

En 1956, el gobierno estadounidense abolió las restricciones sobre la información y conocimientos generados en la creación y desarrollo de reactores que utilizaban uranio enriquecido. El objetivo era establecer un programa de exportación de reactores (bajo el control de las salvaguardas correspondientes) para garantizar el suministro de U^{235} producido en Estados Unidos con los mismos precios del mercado doméstico. Además, se estructuró un esquema financiero para que, a través de la Comisión de Energía Atómica estadounidense, se subsidiara el suministro de combustible y la investigación que desarrollara el sector privado (Azuela y Talancón, 1999: 25-26).

La política de Átomos por la Paz impulsada en Ginebra por el gobierno de los Estados Unidos y la ONU, por medio del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA, creado en 1954), permitió la transferencia de conocimientos y tecnología nuclear para aplicaciones médicas y en la producción de electricidad.

Era claro que otros países como Inglaterra, Canadá, Francia y la Unión Soviética estaban dispuestos a importar la tecnología para la construcción de centrales nucleoelectricas que los Estados Unidos habían desarrollado, por razones económicas y políticas. Así se abrió al mercado mundial a la oferta de conocimientos y tecnología para la creación de energía eléctrica con uranio. Pero, a pesar de que la industria nuclear tenía una fuerte regulación y control de esos Estados y la ONU, generó diferentes espacios de producción que se desarrollaron de acuerdo al tipo de gobierno en el poder y las necesidades de la propia industria de los átomos. Así, se desarrollaron empresas de capital privado como en los EE.UU., las que eran propiedad del Estado como en la URSS y las empresas mixtas (de capital privado y estatal) como en Francia.

A decir del propio OIEA, la Segunda Conferencia Internacional sobre los Usos Pacíficos de la Energía Nuclear celebrada en 1958, fue muy especializada, se invitó a científicos y técnicos de las disciplinas que habían participado en el desarrollo de la energía atómica. Para el Organismo Internacional esta reunión resultó de gran utilidad pues estimuló a los gobiernos a publicar y revisar informes y resultados de investigación, así como del desarrollo de tecnologías nucleares que hasta ese momento se consideraban secretos. De esta manera la información se hizo del conocimiento de todos los interesados. Los países más adelantados en la investigación nuclear habían estado desarrollando trabajos en reactores de investigación y tenían información suficiente y proporcionaron informes indispensables a las naciones menos adelantadas. Por ejemplo, ya se podían obtener radioisótopos en cantidades relativamente considerables y a precios accesibles.

A partir de ese momento, las investigaciones para aplicaciones pacíficas de la energía nuclear dejaron de ser patrimonio exclusivo de unas cuantas naciones e instituciones privilegiadas, podían desarrollarse en otros países y centros de investigación, siempre y cuando tuvieran los recursos económicos suficientes.

Por su parte, las empresas nucleares podían explotar sin trabas las posibilidades que los radioisótopos ofrecían en campos como la medicina, en nuevos métodos de terapéutica y diagnóstico, o para la generación de electricidad. En cuanto a la física teórica, se presenta-

ron informes y conferencias sobre nuevas partículas y sus propiedades que intrigaban y motivaban la imaginación de los físicos (OIEA, 1995: 5).

Con respecto a la industria nuclear, generalmente se tiene idea de que ésta tan sólo es la que se dedica a la generación de electricidad, pero, debemos tener en cuenta que se trata de un término genérico que abarcó por lo menos tres grandes procesos, que se llevan a cabo por distintos tipos de empresas.

1. El de búsqueda y extracción
2. El de transformación
3. El de utilización

El proceso más costoso de éstos es el de enriquecimiento (60% del gasto total); el menos oneroso es el de fabricación de elementos combustibles (10%), y la minería del uranio representa un porcentaje del 30% de la inversión total (Rojas, 1989: 43).

El primer proceso: realmente es una actividad primaria, es decir, de minería. Esta etapa abarca las fases geológica de exploración, minera y de molienda, así como la minería metalúrgica. Estas tres fases que van desde la prospección, extracción y separación del uranio de los otros minerales en los que se encuentra incrustado, con lo que se prepara para ser enviado a las plantas de procesado.

En las plantas de extracción y primer tratamiento que se encuentran en los yacimientos uraníferos o cercanos a ellos se llevan a cabo los siguientes trabajos:

- Extracción
- Quebrado
- Molienda
- Espesamiento o sedimentación neutra
- Lixiviación
- Purificación de los concentrados obtenidos
- Diversas transformaciones físicas y químicas del concentrado nuclearmente puro con el propósito de su utilización en reactores nucleares
- Proceso de transformación en el que se beneficia (se crea el U^{235}), se refina, convierte y se enriquece, además de elaborarse los combustibles nucleares⁵.

Con respecto a la minería del uranio, en la década de los sesenta, cuatro potencias controlaban la extracción del mineral radiactivo, gracias al dominio que ejercían sobre las regiones en donde existían los mayores yacimientos del mismo. El Reino Unido disponía de los yacimientos de Australia, Canadá y Sudáfrica; Estados Unidos, además de poseer sufi-

5 Centro de Información y Documentación del Sector Nuclear "Nabor Carrillo" (CIDSN). Energía nuclear - CNEN - Programa de combustibles nucleares. Exp. 3. Carlos Medrano Delgado. Septiembre, 1969, f. 5.

cientes recursos, ejercía dominio compartido con los británicos en las naciones señaladas. Francia se beneficiaba de los yacimientos de sus ex-colonias en África, básicamente Nigeria y Gabón; finalmente, la Unión Soviética, que además, de poseer sus propias vetas tenía acceso a las de Alemania del Este, Checoslovaquia y Rumania (Rojas, 1989: 43).

En los sesenta operaban únicamente cuatro plantas de enriquecimiento por la técnica de la difusión gaseosa: la del Departamento de Energía de los Estados Unidos, situada en Oak Ridge y que produjo uranio enriquecido para la bomba atómica. Esta empezó a operar en febrero de 1945. Francia, por su parte, estableció una planta, la que empezó a producir en 1964, administrada por el Comisariado Francés de Energía Atómica (CEA) y estaba ubicada en Pierrelatte; el Reino Unido desde 1950 fundó una central, ubicada en Capenhurst, en sus orígenes estaba orientada a usos militares. Finalmente, la Unión Soviética dispuso de ese proceso desde la guerra y mantuvo su planta en Siberia desde sus orígenes. En 1989, apenas existían seis empresas de enriquecimiento del uranio (Rojas, 1989, 44).

En el segundo proceso, el de transformación, se fabrican los combustibles nucleares que constituyen dos tipos de materiales: a) los fisionables y b) los fértiles (materia prima). El material principal es el fisionable, con él se produce la reacción nuclear; el único material fisionable, con neutrones lentos, encontrado en la naturaleza es el U^{235} . Por su parte, el material fértil es el U^{238} que al ser sometido al bombardeo de neutrones forma el Pu^{239} que es un nuevo material fisionable. La fabricación de combustibles nucleares para su utilización militar o en un reactor nuclear se lleva a cabo por un largo procedimiento⁶. Éste se conoce como Ciclo de los Combustibles Nucleares, se lleva a cabo en cinco fases, a saber:

1. Tratamiento de minerales de uranio
2. Refinación de concentrados (Preparación de dióxido de uranio nuclearmente puro, al 99.9%)
3. Conversión a productos nucleares puros
4. Fabricación de elementos combustibles
5. Tratamiento de combustibles irradiados⁷.

Por último, está el proceso de utilización que es muy variado, va desde la generación de energía eléctrica, uso médico, conservación y esterilización de alimentos, así como la fabricación de armas atómicas.

Hasta este momento se ha encontrado más información acerca de las plantas nucleoelectricas o generadoras de electricidad, que sobre las empresas fabricantes de implementos para aplicaciones médicas o militares, para éstas todavía no se ha localizado suficiente información, de tal forma que ahora reconstruiremos y analizaremos el proceso de evolución de la industrias nucleoelectricas.

6 CIDSN. Energía nuclear - CNEN - Programa de combustibles nucleares. Exp. 3. Carlos Merdrano Delgado. Septiembre, 1969, fs. 1-2

7 CIDSN. Energía nuclear - CNEN - Programa de combustibles nucleares. Exp. 3. Carlos Merdrano Delgado. Septiembre, 1969, f. 2

Este es un proceso que ha sido afectado por la evolución económica y socio-política desde su surgimiento. El periodo 1953-1989, lo podemos dividir en dos subperiodos: el primero va de 1953 a 1973, veinte años en los que la industria nuclear conoció un auge ligado al crecimiento económico experimentado en mayor proporción en Europa, los Estados Unidos y la U.R.S.S. Este crecimiento económico fue de menor intensidad en América Latina y Asia. Estos fueron los años en los que se tomó con gran optimismo a la nucleoelectricidad y se pensaba que era la gran solución al problema de la contaminación que producía la electricidad generada con carbón o petróleo, además de ser la solución a la escasez de petróleo y otros combustibles fósiles que se estimaba se iban a agotar en el año 2000.

Para Rojas los años que transcurrieron entre 1953 y 1973 se dio una fase expansiva en la economía mundial, esta situación fue el mejor marco para la evolución y consolidación de una industria naciente como la nuclear, de forma tal que a fines de la década de los años sesenta integraba, además de la fabricación de reactores y combustibles, un conjunto importante de empresas de diseño, ingeniería y construcción; de fabricación de partes, componentes y equipos; de generación de electricidad, así como, de fabricación de armas (Rojas, 1989: 18).

En el año de 1962 se calcula que había en el mundo 234 reactores nucleares en funcionamiento o en construcción. Thomas Reis afirma que 47 de ellos producían energía eléctrica para uso industrial, 28 eran prototipos industriales y el resto (159) eran de 4 tipos distintos de investigación: 70 para fines especiales (el autor no especifica), 19 de alta potencia, 28 de potencia media y 28 de baja potencia (Reis, 1972: 9).

Este mismo autor, afirmaba en 1972 que los EEUU habían cedido el predominio en la generación de electricidad industrial de origen nuclear y en la cantidad de los reactores industriales de potencia en manos de la Gran Bretaña que producía 12,552 MW con 25 reactores, la URSS producía 6,310 en 20 reactores, por 5,163 en 38 reactores estadounidenses. Por su parte, Francia generaba 2,700 MW con ocho reactores, Canadá sólo tenía dos que producían 781 MW, Japón 632 también con dos reactores e Italia 1,828 con tres reactores (Reis, 1972: 9).

El segundo subperiodo, inició en 1973-1974 y finalizó en 1989, la crisis provocada por el incremento en los precios del petróleo limitó los recursos para la producción petrolera, generó una crisis económica mundial que limitó los presupuestos destinados a la construcción y operación de las plantas. Además de que el accidente que sufrió el reactor nuclear Three Mile Island (28 de marzo de 1979) en la isla del mismo nombre en Pensilvania, EEUU, propició que los costos de producción de las plantas nucleares se hicieran muy elevados debido a que las normas de seguridad y salvaguarda para la construcción y operación de las plantas se hicieron más estrictas.

Esta fase de 1973/1974-1989 será de declive lento y prolongado, baja que se empezó a hacer más patente a partir desde 1976, cuando la industria nuclear internacional tuvo una caída en las solicitudes de nuevas plantas e instalaciones, incluso se llegó a la suspensión

de obras que estaban en proceso, además de la disminución en el ritmo de crecimiento e implantación de diversos programas nucleares.

Para Rojas la prolongada recesión y crisis de la industria nuclear se explicaban por factores técnicos, sociales y políticos, que obstaculizaron la obtención de los beneficios esperados por los propietarios de esta industria. Modificaciones en el consumo energético respecto a lo planeado en los años 50 provocadas por la evolución cíclica de la economía. La crisis de 1974-1975, así como su fase depresiva que en muchos países se prolongó hasta 1989, además; el incremento en los requisitos técnicos generaron la acumulación de retrasos en la puesta en marcha de reactores, del mismo modo las especificaciones de seguridad y salvaguardas, se hicieron todavía más exigentes a partir del accidente del reactor número dos de la planta de Three Mile Island.

La depresión económica también generó dificultades presupuestales, pese a que no había implicado la retracción drástica del crédito internacional, en la década de 1980 hubo otros accidentes en plantas de diversas partes del mundo que propiciaron un entorno favorable a la oposición política y social al desarrollo nuclear, en algunos países como Austria, ello significó, incluso la suspensión definitiva de la producción de electricidad con energía nuclear (Rojas, 1989: 19). Pero cómo evolucionó la industria nuclear.

Evolución de la industria nuclear

Retornemos ahora a 1946, este año fue muy importante para el desarrollo de la industria nuclear pues fue cuando el gobierno de los Estados Unidos aprobó el Acta sobre Energía Atómica que autorizó la transferencia de tecnología nuclear del área militar a la civil, también fue cuando se creó la Comisión de Energía Atómica en ese país.

Rojas afirma que hubo un incremento en el consumo de energéticos en los años de 1950 a 1960, que para producirlos se utilizaba entre el 52 y 60% de carbón, la cifra descendió al 35% en 1970, cuando este mineral fue sustituido gradualmente por petróleo. En este contexto la electricidad tomaba cada vez más importancia en los sectores productivos, del transporte, servicio público y consumo privado. El 12.6% de esta energía se generaba con carbón e hidrocarburos en el primer año, cifra que se elevó al 22 en el último año. Por su parte, la electricidad generada por otras fuentes como el vapor geotérmico, energía nuclear o cuencas hidráulicas sólo representó el 2% del consumo mundial (Rojas, 1989: 30).

En 1953 sólo había cinco países en los que operaban reactores nucleares de investigación: Estados Unidos, Canadá, Francia, el Reino Unido y la Unión Soviética, a pesar de las diferencias ideológicas, políticas y el peligro de una guerra nuclear entre los cuatro primeros y la U.R.S.S. se considera a estos países como los pioneros de las aplicaciones pacíficas de la energía atómica.

A partir de ello, en la segunda mitad de la década de los cincuenta empezaron a funcionar los primeros reactores de potencia para producir electricidad en los cinco países cita-

dos anteriormente, en la década siguiente instalaron más centrales electronucleares y se sumó a ellos la República Federal Alemana (RFA)⁸.

Entre 1960 y 1970, se dio un crecimiento espectacular de la producción de electricidad con plantas nucleares. En el primer año, había 106 reactores en operación; mientras que para el segundo, había 189, la capacidad instalada aumentó de 1,106 MW y 16,698 MW, respectivamente. El incremento mundial en el número de reactores instalados fue del 30% anual, lo que representó un ascenso en la generación de electricidad del 60% anual.

Entre 1970 y 1975, el crecimiento en el número de plantas instaladas fue del 19.4% anual, lo que representó una evolución del 70%. El número de reactores en operación en 1970 era de 89, con una capacidad instalada de 16,698 MW, mientras que para 1975 había 175 unidades con de 72,477 MW de generación.

La crisis de los precios del petróleo de principios de la década de los setenta, en un principio activó a la industria nuclear. El incremento de precio de los combustibles fósiles se cuadruplicó, ello incrementó la ventaja competitiva de la energía nuclear sobre otras fuentes energéticas para la generación de electricidad. El año de 1974 fue el que mayor impulso dio a esta industria: la capacidad de las centrales nucleares aumentó aproximadamente, a más de 75,000 MW. En 1975, inició el descenso: el número de nuevos pedidos de centrales nucleares declinó de 75,000 MW en 1974 a 72,477 MW en el primer año, bajo a 11,000 MW en 1976 y al año siguiente 1977 ascendió ligeramente a 13,500 MW⁹.

Desde 1976 la industria nuclear tuvo una caída drástica, se redujeron las solicitudes de nuevas plantas e instalaciones, se suspendieron obras iniciadas o disminuyó el ritmo de crecimiento e implementación de diversos programas nucleares.

La Tabla 1 muestra la situación y existencia de reactores nucleares en el mundo en 1981, el cuadro presenta un total de 617 reactores, se puede observar el impacto de la crisis pues al año siguiente se registraron 261 en operación en el mundo, se estima que había 227 reactores en construcción y 136 en etapa de planeación, ubicados en 35 países.

El problema es que en ese mismo año se cancelaron 18 solicitudes de reactores, al año siguiente siete y en 1984 catorce, lo que sumió a la industria nuclear estadounidense en una crisis muy aguda, de igual forma sucedió con las empresas francesa, alemana, canadiense o sueca. Inclusive, los países denominados vías de desarrollo (en aquel entonces), disminuyeron sus proyecciones de crecimiento del consumo energético. Por ejemplo, México (que había proyectado tener una capacidad instalada de producción de 20,000 MW nucleares para el año 2000), Argentina y Brasil (Rojas, 1989: 54-55).

8 CIDSN. Boletín, *Energía Nuclear México* 235: 3 "Desarrollo de la industria nuclear en el mundo y en México (Apéndice), noviembre, 1982, s.f.

9 CIDSN. Boletín, *Energía Nuclear México* 235: 3 "Desarrollo de la industria nuclear en el mundo y en México (Apéndice), noviembre, 1982, s. f.

TABLA 1 Reactores nucleares en operación, construcción y planeación en el mundo, 1981.		
PAÍS	TOTAL DE REACTORES	CAPACIDAD ELECTRICA (MW)
Argentina	6	3,427
República Federal Alemana	15	5,786
República Democrática Alemana	37	35,369
Bélgica	7	5,471
Brasil	3	3,116
Bulgaria	8	5,632
Canadá	25	15,242
Corea	9	7,433
Cuba	2	816
Checoslovaquia	21	12,636
Egipto	1	622
España	19	16,140
Estados Unidos	177	169,683
Filipinas	1	620
Finlandia	5	3,160
Francia	74	73,195
Gran Bretaña	42	14,260
Hungría	4	1,632
Holanda	2	501
India	1	1,689
Israel	1	600
Italia	9	5,278
Japón	38	27,138
México	2	1,308
Pakistán	2	725

La industria del uranio

TABLA 1 Reactores nucleares en operación, construcción y planeación en el mundo, 1981.		
PAÍS	TOTAL DE REACTORES	CAPACIDAD ELECTRICA (MW)
Polonia	4	1,632
Rumanía	3	1,728
Suecia	12	9,440
Suiza	5	2,882
Sudáfrica	2	1,842
Tailandia	1	600
Turquía	1	672
URSS	76	54,896
Yugoslavia	2	1,632
Total	617	486,806

FUENTE: CIDSN: Boletín, Energía Nuclear México 235: 3 "Desarrollo de la industria nuclear en el mundo y en México (Apéndice), noviembre de 1982, 28 fs.

Tecnología de reactores nucleares

Los reactores que existen en la actualidad básicamente son de origen electromecánico -fue la industria de fabricación de centrales de potencia la que se orientó a la industrialización de reactores-. De esta forma se desarrolló una industria del ciclo del combustible de uranio que conjuntó las empresas de la minería y el uranio enriquecido, ya que este era el proceso fundamental en la fabricación de bombas atómicas, entonces este fue el modelo de planta nuclear que se impuso al mercado internacional.

La Tabla 2 presenta el reducido grupo de empresas de diseño y construcción, servicios, ciclo de combustible, investigación y desarrollo nuclear en el ámbito mundial que se han localizado hasta 1989.

TABLA 2 Empresas diseñadoras y constructoras de Plantas nucleoelectricas.	
PAÍS	EMPRESA
Francia	FRAMATOME (estatal)
	Societe Alsacienne de Constructions Mechaniques (SACM)

TABLA 2	
Empresas diseñadoras y constructoras de Plantas nucleoelectricas.	
PAÍS	EMPRESA
República Federal Alemana. Todas las empresas eran respaldadas por el Dresdner Bank	Kraftwerk Union (AG) (reactores)
	Siemens-Schuckert
	Siemens (ciclo de combustible)
	Hoechst
	RWE (servicios)
	BMFT (financiamiento para investigación y desarrollo)
Gran Bretaña	National Nuclear Corporation (NNC)
	Nuclear Power company Ltd.
	United Kingdom Atomic Energy
	G.E.C. Simon-Carves
	Imperial College, Humpreys Glasgow
Japón. Las tres empresas con acuerdos científicos y tecnológicos con General Electric y Westinghouse	Mitsubishi
	Hitashi
	Toshiba
	Fuji Electric
Estados Unidos	General Electric Co.
	Westinghouse Electric Corp.
	Babcock and Wilcox
	Combustion Engineering
	General Atomic
	Atoms International
	Atomic Power Development Association
	Allis-Chambers Manufacturing Co.
	General Nuclear Engineering Corporation
	Southwest Atomic Energy Associates
	Commonwealth Edison Co.
AEC	

TABLA 2
Empresas diseñadoras y constructoras de Plantas nucleoelectricas.

PAÍS	EMPRESA
Estados Unidos	Yankee Atomic Electric Co.
	Elk River Electric Corprative
	ACF
	Nothern States Power company & Associates
	Power Reactor Development Co.
	Argone National Laboratory
	R&D
	Chugach Electric Assn.
	Nuclear Development Corporation of America
	Atomics International
	Pennsylvania Power & Light Co.
	Baltimore Gas & Electric Co.
	Carolinas-Virginia Nuclear Association, Inc.
	East Central Nuclear Group
	Florida West Nuclear Group
Pacific Gas & Electric company and Bechtel	
Aerojet Genneral	
Suecia	ASEA-Atom
	AB Atomenergi
Canadá	Atomic Energy of Canada (AECL)
URSS	Atomenergoexport
Suiza	Brown Boveri and Cie.
FUENTES: CIDSN: Boletín, Energía Nuclear México 235: 3 "Desarrollo de la industria nuclear en el mundo y en México (Apéndice), noviembre de 1982, 28 fs., ROJAS (1989), REIS (1972), DAWSON (1976).	

Los reactores se clasifican de acuerdo al combustible utilizado, a la velocidad de los neutrones disparados, al moderador que utilizan y al material que se usa como refrigerante, así tenemos la siguiente codificación:

- Según el combustible utilizado
 - De uranio natural
 - De uranio enriquecido
 - Oxidos mixtos de Uranio y Plutonio
- Según la velocidad de los neutrones producida en las reacciones nucleares de fisión:
 - rápidos
 - térmicos
- Según el moderador utilizado:
 - de agua pesada
 - agua ligera
 - grafito
- Según el material usado como refrigerante:
 - De gas (helio o anhídrido carbónico)
 - De agua (ligera o pesada).
 - De vapor de agua
 - De sales fundidas
 - De aire
 - Metales líquidos

Las diferencias entre los tipos de centrales nucleares en operación se basan en el tipo de que utilizan para producir energía. La forma en que se genera a partir del vapor es similar en todas las centrales nucleares.

El diseño y fabricación de plantas nucleares estuvo monopolizado por dos compañías estadounidenses que desarrollaron dos tipos diferentes de tecnología, a partir de la de reactores de uranio enriquecido moderados con agua ligera: Westinghouse Electric Corp. -con reactores de agua ligera a presión (RALP)- y General Electric Co. -con reactores de agua ligera en ebullición (RALE)- transfirieron su tecnología a Francia, Japón y Suecia, lugares en donde la adaptaron e innovaron conservando su núcleo tecnológico original¹⁰.

10 CIDSN. Boletín, *Energía Nuclear México* 235: 3 "Desarrollo de la industria nuclear en el mundo y en México (Apéndice), noviembre, 1982, s.f.

La industria del uranio

El tipo de reactor que dominó hasta 1970 el mercado por su amplia utilización, fue el GCR (Gas Cooled Reactor), que utilizaba uranio natural como combustible, grafito como moderador y gas carbónico (CO₂) como refrigerante. En Francia había cinco y en el Reino Unido 27, países en los que fue manufacturado por los consorcios electromecánicos SACM (Societe Alsacienne de Constructions Mechaniques) y por TNPG (The Nuclear Power Co. Ltd.). Desde ese año los reactores PWR (Pressurized Water Reactor) y BWR (Boiling Water Reactor), manufacturados respectivamente por Westinghouse y General Electric, empezaron a controlar el mercado mundial con el 35% de las plantas (véase Tabla 3).

TABLA 3								
Tipo de reactores, número de unidades y capacidad eléctrica (1981)								
Tipo de reactores	Operación		Construcción		Planeación		Total	
	Unidades	Cap. eléctrica	Unidades	Cap. eléctrica	Unidades	Cap. eléctrica	Unidades	Cap. eléctrica
RALP	115	80,797	135	130,131	109	107,203	359	318,131
RALE	64	36,969	48	50,227	9	9,821	121	97,017
RGG	35	7,284	-	-	-	-	35	7,284
RAGG	4	2,464	10	6,158	-	-	14	8,622
RAPP	15	6,169	22	13,211	4	2,460	41	21,840
RALG	17	8,882	7	8,000	7	7,000	31	23,882
RGGT	2	343	1	296	-	-	3	639
RRC	5	1,013	3	1,730	3	3,250	11	5,993
OTROS	4	562	1	36	4	2,800	9	3,398
TOTAL	261	144,483	227	209,789	136	132,534	624	486,806

FUENTE: CIDSN: Boletín, Energía Nuclear México 235: 3 "Desarrollo de la industria nuclear en el mundo y en México (Apéndice), noviembre de 1982, 28 fs.

Las dos empresas exportaron entre las décadas de 1960 y 1970, más de 25 reactores, cifra que los primeros años de la década del setenta se incrementó a más de 30 reactores, a diferencia de otras firmas prácticamente concentradas en el mercado interno: AECL de Canadá; Framatone de Francia; ASEA-Atom de Suecia y Kraffterk-Siemens de Alemania, que ese mismo periodo empezó a exportar.

En estas dos décadas se dio un incremento de los pedidos de reactores nucleares a las grandes compañías constructoras General Electric, Kraftwerk y Westinghouse, a la par se expandieron las plantas nucleoelectricas, sobre todo en Canadá, Francia, Inglaterra, Japón, Suecia, Alemania y la Unión Soviética. También varios de los denominados países sub-

desarrollados se involucraron en planes nucleoelectricos nacionales: Argentina, Brasil, India, Corea, Pakistán, México, Filipinas, Rumania, Taiwán y Yugoslavia, entre otros, incrementando los pedidos de reactores" (Rojas, 1989: 39-41).

El crecimiento de la industria nuclear se extendió hasta los años 1974 y 1975, tanto en los países industrializados y generó grandes expectativas en países en proceso de industrialización, en los cuales se establecieron programas de diversificación energética con tecnología nuclear. En estas dos décadas se firmaron numerosos convenios de transferencia de conocimientos y tecnología desarrollada, sobre todo, en los Estados Unidos y, en segundo término, en la Unión Soviética. El resultado fue la consolidación de al menos diez empresas de reactores que, bajo licencia de Westinghouse y General Electric, desarrollaron y, en algunos casos, modificaron los dos tipos principales de reactores nucleares: el PWR (Pressurized Water Reactor) y el BWR (Boiling Water Reactor). General Electric suscribió acuerdos con las empresas Allgemeine Elektrizitäts Gesellschaft (AEG, alemana) y con Toshiba y Hitachi (japonesas); Westinghouse, por su parte los estableció con Siemens (alemana) y con Mitsubishi (japonesa), además de que la misma Siemens, más tarde, transfirió tecnología a Fuji Electric, también japonesa (Rojas, 1989: 20).

Empresa	Número de reactores
Westinghouse (Estados Unidos)	93
General Electric (Estados Unidos)	70
FRAMATOME (Francia)	61
Kraftwerk Union (AG) (República Federal Alemana)	26
ASEA-Atom (Suecia)	11
Atomic Energy of Canada (AECL) (Canadá)	26
Combustion Engineering(Estados Unidos)	16
Toshiba (Japón)	11
Nuclear Power company Ltd. (Inglaterra)	11
Mitsubishi (Japón)	15
United Kingdom Atomic Energy (Inglaterra)	10
Atomenergoexport (URSS)	99
Total	449

Fuente: FUENTES: CIDSN: Boletín, Energía Nuclear México 235: 3 "Desarrollo de la industria nuclear en el mundo y en México (Apéndice), noviembre de 1982, 28 fs. Y ROJAS (1989).

Rojas Nieto afirma que aparte de la influencia inicial estadounidense (véase Tabla 4), otras firmas produjeron reactores para el mercado mundial: la empresa suiza Brown Boveri and Cie.; la francesa Framatone -en sociedad con Westinghouse-, la británica Parsons; la sueca ASEA Atom, y también Atomenergoexport. Con otro tipo de reactor el HWR (Heavy Water Reactor), el consorcio canadiense, producto de una asociación múltiple con General Electric, Westinghouse, Babcock and Wilcox, ofreció una opción tecnológica a los aparatos PWR y BWR que utilizan uranio enriquecido y agua ligera como moderador, pues el HWR utilizaba uranio natural y agua pesada. Sobre la base de esta expansión y difusión tecnológicas, el número de reactores nucleares generadores de electricidad creció de 16 en 1960 a 89 en 1970 y a 75 en 1975, para luego experimentar una impresionante desaceleración que se agudizó en los últimos años (Rojas, 1989: 20-21).

Conclusiones

Este artículo es un avance de una investigación colectiva y de largo aliento. Aquí se presenta un panorama general de la industria nuclear en el ámbito internacional para el periodo 1945-1989. Una industria ligada a la ciencia, tecnología y política, factores todos ellos que se interrelacionaron para crear empresas productoras de nuevas tecnologías y electricidad para aplicaciones industriales y el servicio público, además, de las aportaciones a la biología y medicina.

El artículo no pretende dar por concluido el tema de la industria nuclear, quedan todavía muchas dudas y preguntas por resolver. Por ejemplo ¿Cuál fue la evolución particular en cada país que desarrolló industria de esta naturaleza? ¿En los países que no son considerados pioneros de la investigación y tecnología nucleares cómo se dieron las transferencias de conocimientos y tecnologías a los países considerados subdesarrollados en aquella época? ¿Éstos últimos lograron una evolución propia de la explotación del átomo?

En fin, se abren otros temas para la investigación, como por ejemplo en los Estados Unidos en donde se pensó que sería un buen negocio la industria nuclear y sus productos, se dio una asociación entre gobierno y empresas particulares para su puesta en marcha y funcionamiento, entre 1945 y 1989.

También habrá que analizar los factores políticos, económicos, sociales y culturales que llevaron a la decadencia de esta industria como alternativa energética segura y limpia para el mundo en las dos últimas décadas del siglo XX.

Agradecimientos

Deseo hacer patente mi agradecimiento a la C. Gabriela Caballero y a la Lic. Elvia Elizabeth Cortés por el apoyo que me brindaron en la búsqueda de información en el AHCMSV; al Programa de Mejoramiento del Profesorado (PROEP), SEP, a través de su Programa de Fortalecimiento de Cuepas Académicos; así como a la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidades Iztapalapa y Xochimilco, por el apoyo financiero otorgado al Proyecto de in-

investigación colectivo La quimera del uranio. Historia de la exploración, extracción y explotación del uranio en México.

Fuentes consultadas

Archivo

Centro de Información y Documentación del Sector Nuclear "Nabor Carrillo" (CIDSN), Salazar, Estado de México, México.

Bibliografía

- Azuela, L. F. y J. L. Talancón (1999). *Contracorriente. Historia de la energía nuclear en México (1945-1995)*. Centro de Enseñanza para Extranjeros-Instituto de Investigaciones Sociales-Instituto de Geografía Universidad Nacional Autónoma de México y Plaza y Valdés Editores, México. 472 pp.
- Bernal, J. D. (1960). *La ciencia de nuestro tiempo*. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 534 pp.
- Dawson, F. G. (1976). *Nuclear Power. Development and Management of a Technology*. University of Washington Press. Seattle and London. 320 pp.
- Gamov, G. (1971). *Biografía de la física.*, Salvat-Alianza Editorial, Madrid. 262 pp.
- Ortega, M. (en prensa). "La faceta política de la ciencia: el desarrollo de la energía nuclear y el problema político de su utilización". En: *Manuel Sandoval Vallarta en su época. Relaciones sociales y culturales, influencias científicas y políticas*. (F. Lazarín, B.E. García y M. Ortega, coords) Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa, México.
- McClellan III, J.E. y H. Dorn (2006). *Science and Technology in World History. An Introduction*. The John Hopkins University Press. Baltimore. 478 pp.
- Reis, T. (1972). *Tecnología de los reactores nucleares. Tomo 2 Reactores nucleares de uranio natural, grafito y gas*. Ediciones Urmo. Bilbao. 386 pp.
- Rojas, J.A. (1989), *Desarrollo nuclear de México.*, Facultad de Economía, Universidad Nacional Autónoma de México. México. 213 pp.

Hemerografía

- Álvarez, M. Jr. (1958). "Consideraciones generales sobre depósitos de uranio", México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana.*, V. 21: 1-65.

Fuentes electrónicas

Agrupación para el Impulso y Desarrollo de la Astronomía. <http://www.cca.org.mx/cca> [2014/02/04].

Energía nuclear. <http://energia-nuclear.net/definiciones/isotopo.html>. [2014/01/28].

Geosalud. <http://www.geosalud.com/Ambiente/Radiacion/uranio.htm> [2014/02/04].

Ojo científico. <http://www.ojocientifico.com/5392/caracteristicas-del-uranio> [014/02/04].